

# 位置と伝搬チャネルの能動的推論による基地局間協調送受信

大歳達也<sup>†</sup> 村田正幸<sup>††</sup>

<sup>†</sup> 大阪大学 経済学研究科  
大阪府豊中市待兼山町 1 - 7  
<sup>††</sup> 大阪大学 大学院情報科学研究科  
大阪府吹田市山田丘 1 - 5

E-mail: <sup>†</sup>tt-otoshi@econ.osaka-u.ac.jp, <sup>††</sup>murata@ist.osaka-u.ac.jp

**あらまし** 本研究では、無線通信技術における基地局間の協調型ビームフォーミングに着目し、新たなアプローチとして自由エネルギー原理 (FEP) に基づいた方法を提案している。従来、ビームフォーミングにおいては、取得するチャネル情報の正確性とオーバーヘッドのトレードオフが課題であった。FEP では、観測による価値と行動による価値のトレードオフを考慮して最適な行動を選択することでこのトレードオフを解決している。これにより、環境変動が生じる動的な状況でも、適応的に探索、推論、学習を統合的に行うことで対応が可能となる。さらに、階層的な協調構造を導入することで、基地局間の情報共有とエージェントの状態間接共有を実現し、ビームフォーミングの効率性と安定性を向上させる。また、本研究では、ISAC (Integrator Sensing And Communication) を活用による通信と実世界のセンシングの同時実行を想定し、端末からのフィードバックと端末の位置情報を統合してチャネル状態推定を行うことで、より少ないオーバーヘッドで適切なビームを選択する。シミュレーションの結果、提案手法は SINR (Signal to Interference and Noise Ratio) の向上に寄与し、ビームフォーミングの安定化に有効であることが示された。

**キーワード** 能動的推論, 位置推定, 伝搬チャネル推定, 基地局間協調送受信, 自由エネルギー原理

## Coordinated Multi-Point with Hierarchical Active Inference of Position and Propagation Channel

Tatsuya OTOSHI<sup>†</sup> and Masayuki MURATA<sup>††</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Economics, Osaka University  
1-7 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka, 560-0043 Japan  
<sup>††</sup> Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University  
1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka, 565-0871 Japan

E-mail: <sup>†</sup>tt-otoshi@econ.osaka-u.ac.jp, <sup>††</sup>murata@ist.osaka-u.ac.jp

**Abstract** This study focuses on cooperative beamforming among base stations in wireless communication technology and proposes a new approach based on the free energy principle (FEP). Conventionally, the trade-off between accuracy of channel information to be acquired and overhead has been a challenge in beamforming; FEP solves this trade-off by considering the trade-off between the value from observation and the value from action to select the optimal action. This makes it possible to respond to dynamic situations where environmental fluctuations occur by integrating adaptive search, reasoning, and learning. Furthermore, by introducing a hierarchical coordination structure, information sharing among base stations and indirect state sharing among agents are achieved, which improves the efficiency and stability of beamforming. In addition, this study assumes simultaneous execution of communication and real-world sensing by utilizing ISAC (Integrator Sensing And Communication), and integrates feedback from terminals and terminal location information for channel state estimation, thereby reducing the overhead of The proposed method is based on the assumption of simultaneous communication and real-world sensing by utilizing SINR Ring And Communication. Simulation results show that the proposed method is effective in improving SINR (Signal to Interference and Noise Ratio) and stabilizing beamforming.

**Key words** Active Inference, Position Estimation, Propagation Channel Estimation, Coordinated Multi-Point, Free Energy Principle

## 1. はじめに

近年、無線通信技術において、ビームフォーミングが重要視されている。ビームフォーミングは、送信アンテナアレイを用いて送信電波の指向性を制御することにより、通信品質と通信容量を向上させる技術である。特に、ビームフォーミングと Massive MIMO (Massive Multiple Input Multiple Output) を組み合わせることで、指向性の向上が可能である [1]。また多数の送信アンテナを利用することで、複数の UE (User Equipment) 機器との同時通信を可能にする。

しかし、複数のセルからなるセルラー通信において、セルの境界領域では、基地局間の協調が必要となる。境界領域では複数のセルからの電波が端末に届くため干渉の影響が強く現れる。そのため、複数の基地局が協調してビームフォーミングを行い、境界領域における UE 機器の通信品質を向上させる CoMP (Coordinated Multi-Point) 運用の必要性が生じる [2], [3]。

CoMP は協調の方式は、チャンネル状態の推定精度に依存する。正確な情報が得られる場合、複数の基地局が同じ信号を送信する共同送信 (JT) により、高いスループットを達成することができる [4]。一方で、正確な情報が得られない場合は、複数の基地局が干渉を避けながら異なる信号を送信する協調スケジューリング/ビームフォーミング (CS/CB) が採用される。この場合、スループットは JT に比べて低下する。

また、チャンネル状態の推定自体はデータ送信の間にトレードオフがある。正確な情報を得るためには、ある程度のフィードバック情報を取得する必要がある [5]。通常、専用のパイロット信号がフィードバック目的で送信される。チャンネル状態推定のためにパイロット信号を送信すると、データ送信に利用できるリソースが制限される。また、また、どのビームを送信するかによって得られるフィードバック情報が異なる。そのため、測定用にビームを切り替える必要がある。このことは、フィードバックを得るために、データ送信に最適化されたビームで送信する機会を犠牲にする必要が生じることを意味する。

一方で、近年 ISAC (Integrater Sensing And Communication) [6] として、電波を通信に用いるだけでなく、センシングに用いることも検討が進んでいる。ISAC を用いることで、データ通信のフィードバックに加えて、位置情報などの現実世界の情報をチャンネル状態推定に活用することが可能となると考えられる。ただし、マルチモーダルな入力をどのように統合して推定に活用するかや、モーダル間での精度のトレードオフなどが課題となる。

このような課題に対処するために、人間の脳の働きからヒントを得て、自由エネルギー原理 (FEP) [7] を使用する。FEP では、探索値と利用値の組み合わせである自由エネルギーを最小化することを目標とする。自由エネルギーを最小化することで、FEP は探索と搾取のバランスをとる行動の選択を可能にする。つまり、FEP は、探索と搾取のトレードオフのバランスをとるという点で、システムが最適な行動を選択することを可能にする。これにより、環境変動が生じる動的な状況でも、適応的に探索、推論、学習を統合的に行うことで対応が可能となる。

本稿では、FEP を用いたセル間協調型のビームフォーミングを提案する。これを実現するために、各基地局に FEP エージェントを配置し、それらの行動を調整する上位の FEP エージェントを配置する。下位エージェントは上位エージェントからの情報と UE からのフィードバック情報とセンシング情報を用いてビームフォーミングを行う。上位エージェントは下位エージェントの状態を観測し、予測状態の形でフィードバックを提供します。このような階層構造を採用することで、協調ビームフォーミングが実現され、システム全体の一貫性が確保される。

以降の本稿の構成は以下の通りである。2. 章では、本稿で扱うシステムモデルについて述べる。3. 章では、自由エネルギー原理による能動的推論の概要について述べる。4. 章では、能動的推論を用いた複数セル間協調のビームフォーミング手法について述べる。5. 章では、提案手法のシミュレーション結果について述べる。6. 章では、本稿のまとめを述べる。

## 2. システムモデル

### 2.1 構成要素

$M$  個のマクロセルと、 $S$  個のスマールセルが存在し、 $D$  台の UE と通信を行う。下りの通信において、基地局からのビームフォーミングによる電波が、各 UE 上で干渉する状況を想定する。

マクロセルの基地局の集合  $B^{(m)}$ 、スマールセルの集合  $B^{(s)}$ 、UE の集合  $U$  を以下のように定める。

$$B^{(m)} = \{b_i^{(m)} | i = 1, \dots, M\} \quad (1)$$

$$B^{(s)} = \{b_i^{(s)} | i = 1, \dots, S\} \quad (2)$$

$$U = \{u_i | i = 1, \dots, D\} \quad (3)$$

また、基地局全体の集合を  $B = B^{(m)} \cup B^{(s)}$  とする。

### 2.2 チャンネル係数とビームフォーミング

各基地局  $b$  は  $M_b$  個のアンテナを用いて電波を送信し、空間特性により変換を受けて受信側の UE  $u$  の  $M_u$  個のアンテナに到達する。この時、空間の特性は行列  $H^{u,b}(t)$  で表され、その要素  $h_{ij}^{u,b}(t)$  はアンテナ  $i$  からアンテナ  $j$  に送信する際のチャンネル係数を表す。

各時刻において、各 UE  $u$  は、いずれか一つの基地局  $b$  と接続しており、その対応関係を  $A(t)$  で表す。 $A(t)$  の要素  $a_{u,b}(t)$  は  $u$  と  $b$  が接続している場合に 1 であり、それ以外は 0 である。

各基地局は、アンテナ毎に送信する電波の位相・振幅を設定しビームフォーミングを行う。位相はビームベクター  $\vec{w}_b(t)$ 、振幅は  $P_b(t)$  によって表わし、送信信号  $x_b(t)$  と受信信号  $y_{u,b}(t)$  の間に以下の関係が成り立つ。

$$\vec{y}_{u,b}(t) = \sqrt{P_b(t)} H^{u,b}(t) \vec{w}_b(t) \circ \vec{x}_b(t) \quad (4)$$

ただし、 $\circ$  は要素毎の積を表す。

### 2.3 電波干渉

UE  $u$  には、他の基地局から送信された電波及びノイズを含んだ信号が届くため、 $u$  の受信信号は以下で表される。

$$\vec{y}_u(t) = \vec{y}_{u,b}(t) + \sum_{b' \in B \setminus \{b\}} \vec{y}_{b'}(t) + \sigma_u(t) \quad (5)$$

この時、SINR(Signal to Interference & Noise Ratio) は以下で表される。

$$\gamma_u(t) = \frac{P_b(t) \|H^{u,b}(t) \vec{w}^b(t)\|^2}{I_u(t) + \sigma_u^2(t)} \quad (6)$$

$$I_u(t) = \left\| \sum_{b' \in B \setminus \{b\}} \vec{y}_{b'}(t) \right\|^2 \quad (7)$$

ここで、 $I(t)$  は干渉電波の強度、 $\sigma^2(t)$  はノイズの強度を表す。

#### 2.4 目的関数

UE  $u$  へのデータの伝送レートは SINR を用いて次のように見積もられる [8], [9]。

$$C_u(t) = \log(1 + \gamma_u(t)) \quad (8)$$

したがって、SINR を最大化することで伝送レートを最大化可能である。本稿では、SINR の最大化を目的関数としてビームフォーミングを行う。ただし、FEP では目的関数は選考分布を通して定義される。詳細は 4. 章で述べる。

そのほかの目的関数として、電力効率 [8] や、フェアネスを考慮した電力効率 [9] が用いられることもある。本稿では、SINR の最大化を目的関数とするが、これらの目的関数を用いても本稿の提案手法は適用可能である。

#### 2.5 位置センシング

ISAC では、基地局からセンシング用の信号を送信し、環境中の物体からの反射波を受信することで、反射物の位置推定を行う [6], [10], [11]。この場合、反射物は端末に限らないため、単独では端末の同定に至らない。このため、複数の端末が存在する場合、目標の端末以外の位置も区別なく与えられることとなる。

したがって、位置情報としては、各地点における反射物の密度情報が得られるものとする。エリア  $A$  における反射物の密度を  $\rho(A)$  として、全エリアの反射物の密度を  $\rho$  とする。この時、 $\rho$  は以下のように定義される。

$$\vec{\rho} = (\rho(A_1), \dots, \rho(A_M)) \quad (9)$$

$M$  はエリアの数であり、 $A_i$  は  $i$  番目のエリアを表す。

ISAC では、従来の通信レートを保ちながら、同時に位置情報を取得することが可能である。通信レートの一部を犠牲とすることで位置情報をより高精度に取得することも可能であるが、本稿では、通信レートを保ちながら位置情報を取得することを前提とする。また、この場合に生じる位置情報の誤差はエリアの粒度に吸収されているものとする。

### 3. 能動的推論

自由エネルギーの原理に基づく能動的推論の文脈では、選択された一連の行動を表す方針  $\pi = (a_1, \dots, a_T)$  は、以下の期待自由エネルギーを最小化するように決定される。

$$G(o_{1:T}, s_{1:T}, \pi) = E_Q[\log Q(s_{1:T}, \pi) - \log \tilde{P}(o_{1:T}, s_{1:T}, \pi)] \quad (10)$$

ここで、 $o_{1:T}$  は観測値、 $s_{1:T}$  は状態、 $Q$  は近似事後分布、 $\tilde{P}$

は目標分布を表す。本稿で扱うビームフォーミングとの具体的な対応については、4. 章で述べる。

$\pi$  が与えられたとき、各時間ステップでの期待自由エネルギー  $\tau$  は独立に以下のように計算できる。

$$G_\tau(\pi) = E_{Q(o_\tau, s_\tau | \pi)}[\log Q(s_\tau | \pi) - \log \tilde{P}(o_\tau, s_\tau | \pi)] \quad (11)$$

$$\geq -E_{Q(o_\tau | \pi)}[D_{KL}(Q(s_\tau | o_\tau, \pi) \| Q(s_\tau | \pi))] - E_{Q(o_\tau | \pi)}[\log \tilde{P}(o_\tau)] \quad (12)$$

上式の第 1 項は、新しい観測値  $o_\tau$  を得ることによる事後分布更新の情報利得である。第 2 項は観測値  $o_\tau$  に基づく期待効用を表す。この効用は、事前分布  $P(o_\tau)$  によって事前に指定する必要がある。第 1 項も第 2 項も負であり、情報利得と効用が増加すると、期待自由エネルギーは減少する。

複数の基地局を持つビームフォーミングの場合、基地局の数だけ観測、状態、アクションの数が増える。特に、状態や行動については、それらの組み合わせを考慮した分布計算が必要となり、システム全体の期待自由エネルギーを最小化することは現実的ではない。そのため、各基地局に配置された能動推論エージェントは、局所的な情報に基づいて局所的な行動を決定することが望ましい。そこで、各基地局  $b \in B$  は、局所観測情報  $o_\tau^{(b)}$  と局所状態  $s_\tau^{(b)}$  の下で、以下の局所自由エネルギーを最小化する局所行動列  $\pi^{(b)} = (a_1^{(b)}, \dots, a_T^{(b)})$  を決定する。

$$G_\tau(\pi^{(b)}) = E_{Q(o_\tau^{(b)}, s_\tau^{(b)} | \pi^{(b)})}[\log Q(s_\tau^{(b)} | \pi^{(b)}) - \log \tilde{P}(o_\tau^{(b)}, s_\tau^{(b)} | \pi^{(b)})] \quad (13)$$

この場合、他の基地局との協調は、局所観測情報  $o_\tau^{(b)}$  や予測・予測誤差の交換によって実現される。FEP では、同じ階層レベルでの協調は、他のエージェントが観察を通じて、エージェントの行動結果を観察することによって達成される [12]。一方、上位階層と下位階層の間の協調は、上位階層が抽象度の高い下位階層の状態を予測し、下位階層が予測誤差を上位階層に伝えるという、予測と予測誤差の交換によって実現される [13]。

## 4. 提案手法

### 4.1 下位層エージェント

下位層のエージェントは各セルに配置され、端末からのフィードバック及びセンシングされた密度情報を観測値として、ビームを決定する。下位層のエージェント同士は独立しているものの、上位層から予測分布を受け取り、選好分布に沿った制御を実現することでエージェント間の協調を行う。

#### a) 観測値

基地局  $b$  は端末からのフィードバックを元に各 UE への伝送レート  $\vec{C}_b(t)$  を観測できるものとする。

また、基地局は端末とのデータ通信と同時に、センシング用の信号を送信しその反射波を受信することで環境中の人の位置情報を取得する。ただし、人の同定まで至らないことを考慮して、取得された人の位置はエリア毎の密度  $\vec{p} = (p_1, \dots, p_A)$  として観測されるものとする。推定位置の誤差はエリアに分けることで吸収されるため、位置の不確かさは主に人の特定の不確

かさによるものとする。

従って、 $\vec{o}_b(t) = (\vec{C}_b(t), \vec{p})$  に対応する。

#### b) 状態

観測した伝送レート  $\vec{C}_b(t)$ 、及び、自身のビームフォーミングの情報に基き、チャンネル係数  $H^{u,b}(t)$  を推定する。

また、ターゲットとしている端末が存在するエリア  $a$  が未知であるため、密度情報と端末からのフィードバックをもとに  $a$  を推定する。

従って、システムの状態は、 $s_b(t) = (H^{u,b}(t), \vec{C}_b(t), a)$  に対応する。

状態の事前分布は上位層による下位層の状態の予測分布として与えられ、下位層が上位層の想定に沿うように制御を行うことで、下位層同士の協調が実現される。従って、下位層における状態の事前分布を以下で与える。

$$\tilde{P}_C(s_b(t)) = P(s_b(t)|o_{b^h}(t)) \quad (14)$$

ここで、 $b^h$  はマクロセルの基地局を表す。

#### c) 行動

基地局はビームベクトル  $\vec{w}_b(t)$  によってビームの形状を指定し、送信電力  $P_b(t)$  を決定する。従って、 $a_b(t) = (\vec{w}_b(t), P_b(t))$  が対応する。

#### d) 選好分布

選好分布は制御にとって望ましい状態を、観測値に対する事前分布として設定する。

ビームフォーミングの既存手法では、電力効率や、伝送レートの最大化が目的関数となる。このような特定の目的関数  $R_b(o_\tau)$  を設定する場合、効用が選好分布の対数で測られることから、以下のボルツマン分布を選好とすることで  $R(o_\tau)$  を選好に反映することができる。

$$\tilde{P}_R(o_\tau) \propto \exp(\beta R(o_\tau)) \quad (15)$$

$\beta$  はパラメータであり、目的関数の大小によってどれだけ選好が偏るかを表す。

### 4.2 上位層エージェント

上位層のエージェントはマクロセルに配置され、下位層のエージェントが推定する状態を観測値として、上位層は CoMP の設定 (JT を行う下位層のグループ) を決定する。上位層の状態の予測分布は下位層の状態の事前分布として用いられる。

#### a) 観測値

下位層の基地局  $b^l$  における状態の推定結果  $P(s_{b^l}(t)|o_{b^l}(t))$  を観測値とする。従って、 $\vec{o}_b(t) = P(s_{b^l}(t)|o_{b^l}(t))$  に対応する。

#### b) 状態

上位層では各下位層のチャンネル係数  $H^{u,b^l}(t)$  及び、ターゲットとしている端末のエリア  $a$  に基づいて制御を行う。従って、 $s_b(t) = (a, H^{u,b^l_1}(t), H^{u,b^l_2}(t), \dots)$  に対応する。

#### c) 行動

上位層では JT を行う下位層の基地局のグループを決定する。すなわち、スモールセルの集合の部分集合を  $G \subseteq B^{(s)}$  として、 $a_b(t) = G$  を定める。

#### d) 選好分布

選好分布は下位層と同様に電力効率や伝送レートを用いたボルツマン分布とする。ただし、上位層ではシステム全体についての集約した電力効率・伝送レートを用いる点が下位層とは異なる。

## 5. シミュレーション

FEP による縦連携によるビームフォーミングにおいて ISAC による位置推定を用いることの有効性を確認するためにシミュレーションを行う。

### 5.1 設定

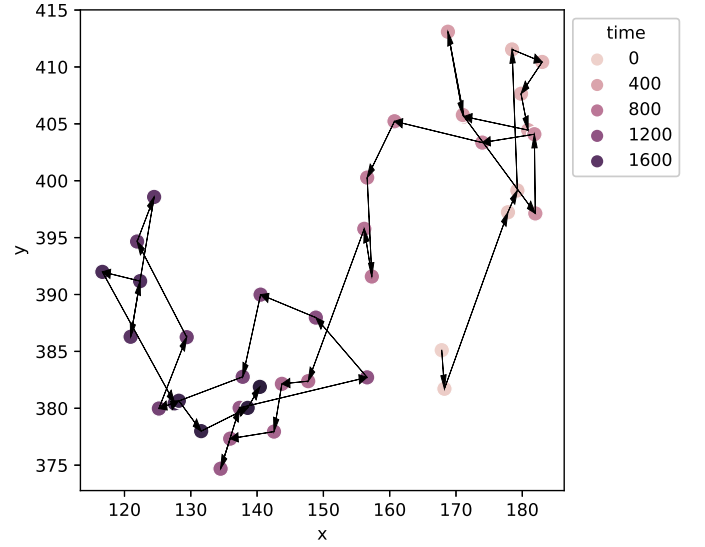


図1 端末の移動の軌跡

アンテナを1本持つ1台のUEに対して、 $N = 4$ 本のアンテナを持つ2台の基地局から電波を送信する。位置推定の効果を確認するため、端末が移動する状況での評価を行う。端末の移動はランダムウォークで行う。ランダムウォークは1秒あたり1mの標準偏差を持つガウス分布に従うと仮定した。時速に換算すると3.6km/hであり、人の歩行速度とほぼ同じである。

端末の位置に応じて、チャンネル係数を以下のように設定する [8]。

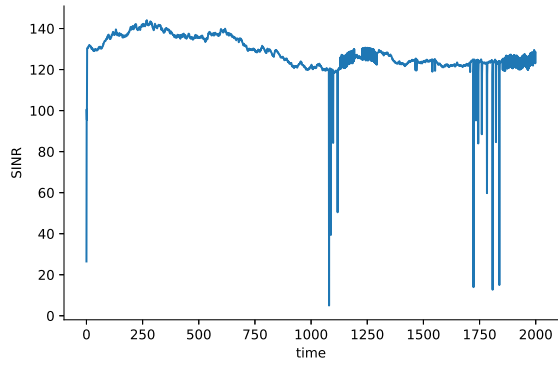
$$h_{ij} = \sqrt{\frac{\beta_{i,j}}{L}} \sum_l^L a_{i,j}^\dagger(\theta_l) \quad (16)$$

$$a_{i,j}(\theta_l) = \frac{1}{\sqrt{N}} (1, \exp(\pi i l \cdot 1 \cos \theta_l), \dots, \quad (17)$$

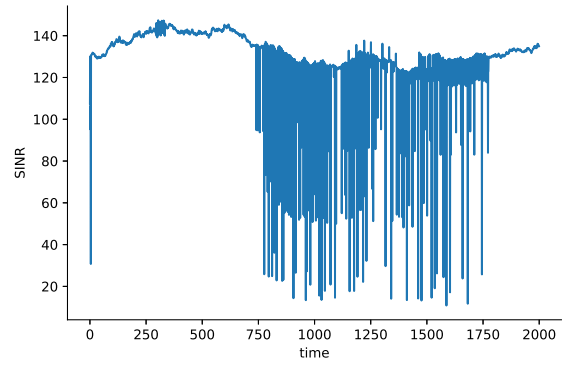
$$\exp(\pi i l \cdot (N-1) \cos \theta_l)) \quad (18)$$

$L$  は基地局から端末までのパス数であり、 $L = 4$  を用いる。 $\theta_l$  はパス  $l$  の送射角を表し、 $(\bar{\theta}_l - \vartheta/2, \bar{\theta}_l + \vartheta/2)$  の一様分布に従う。端末の移動に応じて、送射角の平均値  $\bar{\theta}_l$  を変化させる。 $\beta_{i,j}$  は距離による減衰を表し、これも端末の移動に応じて変化させる。ノイズ強度は-114dBmとする。

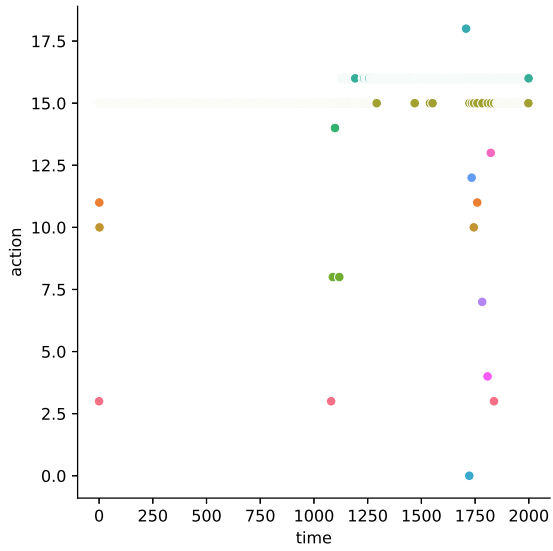
ビームフォーミングベクトルは事前に用意した  $N$  種類のコードブック [8] から選択するものとする。 $i = 1, \dots, N$  番目のビー



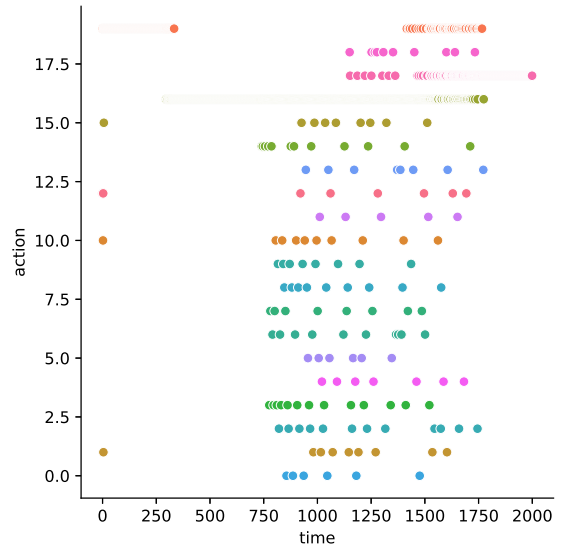
(a) SINR(電波強度+位置情報)



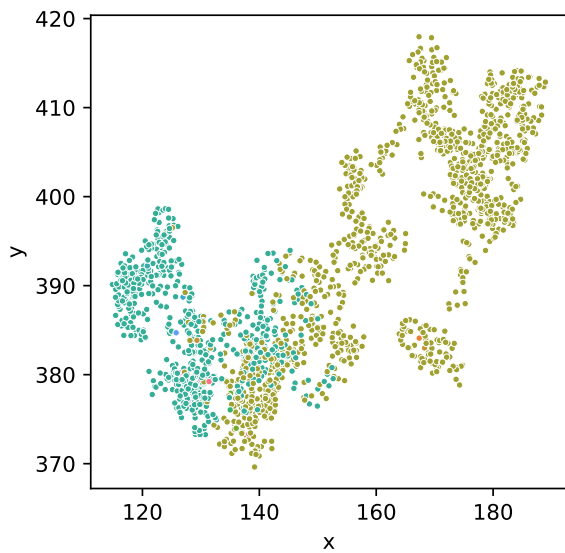
(b) SINR(電波強度のみ)



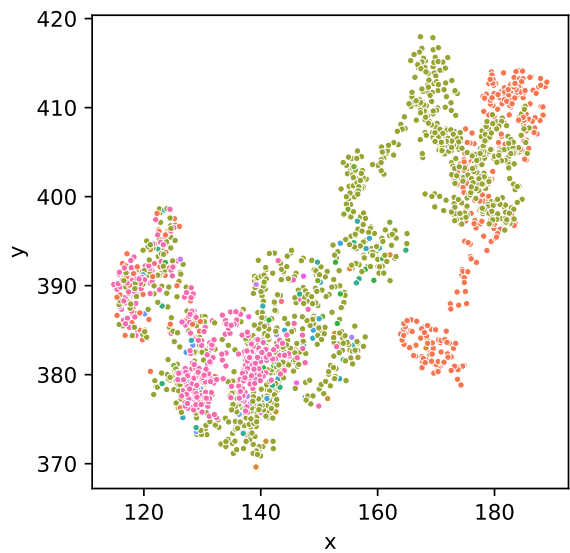
(c) セル 1 で選択されたビームの時系列 (電波強度+位置情報)



(d) セル 1 で選択されたビームの時系列 (電波強度のみ)



(e) 端末の位置とセル 1 で選択されたビーム (電波強度+位置情報)



(f) 端末の位置とセル 1 で選択されたビーム (電波強度のみ)

図 2 シミュレーション結果

ムフォーミングベクトルは以下の通りである。

$$\vec{w}_n = \left( \frac{1}{\sqrt{N}} \exp\left(\frac{2\pi i(n-1)0}{N}\right), \dots, \right. \quad (19)$$

$$\left. \frac{1}{\sqrt{N}} \exp\left(\frac{2\pi i(n-1)(N-1)}{N}\right) \right) \quad (20)$$

基地局は UE からの SINR をフィードバックとして観測すると同時に、各 UE の位置を空間上の密度情報として観測する。観測結果を得た際に、内部モデル・状態の更新と、次に送信するビームの電力とビームフォーミングベクトルを決定する。内部モデル  $P(o_\tau | s_\tau, \pi)$ ,  $P(s_\tau | s_{\tau-1}, \pi)$  の初期値は、ランダムな条件付き確率を初期モデルとして設定する。

## 5.2 動作結果

ISAC によるセンシングを用いる効果を確認するため、位置情報（密度情報）を FEP の入力として用いた場合と用いない場合の動作を比較する。

図 1 に、ランダムウォークする端末の軌跡を表す。図 2 に、位置情報を用いた場合と用いない場合のシミュレーション結果を示す。(a),(b) はそれぞれの場合の SINR の時系列であり、(c),(d) はそれぞれの場合の各時刻で選択されたビームを表す。(e),(f) はそれぞれの場合の端末の位置を表す。色はセル 1 で選択されたビームを表しており、(c),(d) の色と対応している。

図より、位置情報を用いた方が SINR が安定して高い期間が長く、また、ビームの変更も少ないことが分かる。端末は時刻 1000 の前後で右側のエリアから左下のエリアへと移動し中央に戻るといった動きをしている。位置情報を用いた場合、セル 1 では右側と左側の位置に応じて主に 2 種類のビームを切り替えている。位置情報を用いない場合でも同じように位置に応じたビームの選択が見られるが、よりビームの変更が行われている。特に右側、左側の境界に位置するような地点では、様々なビームが一時的に選択されていることがわかる。これは、位置情報を用いない場合では探索的なビーム選択が中心になるのに対して、位置情報を用いた場合は、位置情報からビームの候補を絞った結果、探索的なビームの選択が抑えられるためである。

## 6. まとめ

本研究では、複数基地局間の協調型ビームフォーミングにおける情報の取得と制御性能のトレードオフを考慮して情報取得と制御のバランスを調整する手法を提案した。この手法は FEP に基づき、基地局に設置された FEP エージェントがユーザー端末からのフィードバックとセンシング情報を用いてビームフォーミングを行う。エージェント同士の協調は、階層構造の導入により、エージェントの状態を間接的に共有することで、全体としてのビームフォーミングの効率性と安定性を向上させる。シミュレーションの結果、提案手法が SINR の向上に寄与し、特に ISAC によりセンシングした位置情報を、端末からのフィードバックによるチャネル情報と併用することで、より安定したビームフォーミングが実現できることを示した。今後の課題として、より実環境に近い環境での評価や、位置情報の精度が低い場合のノイズの影響を考慮した評価が挙げられる。

## 謝 辞

本研究は JSPS 科研費 JP20K14735 の助成を受けたものである。

## 文 献

- [1] F. A. P. de Figueiredo, "An overview of massive MIMO for 5G and 6G," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 20, no. 6, pp. 931–940, 2022.
- [2] M. S. J. Solaija, H. Salman, A. B. Kihero, M. İ. Sağlam, and H. Arslan, "Generalized coordinated multipoint framework for 5G and beyond," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 72 499–72 515, 2021.
- [3] T. K. Tandra, F. Tajrian, A. Hossain, M. T. Kawser, M. R. Akram, and A. B. Shams, "Joint transmission coordinated multipoint on mobile users in 5G heterogeneous network," in *2022 IEEE 2nd Conference on Information Technology and Data Science (CITDS)*. IEEE, 2022, pp. 273–278.
- [4] S. Kumagai, T. Kobayashi, T. Oyama, C. Akiyama, M. Tsutsui, D. Jit-sukawa, T. Seyama, T. Dateki, H. Seki, M. Minowa *et al.*, "Experimental trials of 5G ultra high-density distributed antenna systems," in *2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall)*. IEEE, 2019, pp. 1–5.
- [5] X. Wang, X. Hou, L. Chen, Y. Kishiyama, and T. Asai, "Deep learning-based massive MIMO CSI acquisition for 5G evolution and 6G," *IEICE Transactions on Communications*, vol. 105, no. 12, pp. 1559–1568, 2022.
- [6] A. M. Elbir, K. V. Mishra, S. Chatzinotas, and M. Bennis, "Terahertz-band integrated sensing and communications: Challenges and opportunities," *arXiv preprint arXiv:2208.01235*, 2022.
- [7] K. Friston, "The free-energy principle: a unified brain theory?" *Nature reviews neuroscience*, vol. 11, no. 2, pp. 127–138, 2010.
- [8] K. Yu, G. Wu, S. Li, and G. Y. Li, "Local observations-based energy-efficient multi-cell beamforming via multi-agent reinforcement learning," *Journal of Communications and Information Networks*, vol. 7, no. 2, pp. 170–180, 2022.
- [9] H. Al-Obiedollah, K. Cumanan, J. Thiyaalingam, A. G. Burr, Z. Ding, and O. A. Dobre, "Energy efficiency fairness beamforming designs for MISO NOMA systems," in *2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. IEEE, 2019, pp. 1–6.
- [10] F. Liu, Y. Cui, C. Masouros, J. Xu, T. X. Han, Y. C. Eldar, and S. Buzzi, "Integrated sensing and communications: Toward dual-functional wireless networks for 6G and beyond," *IEEE journal on selected areas in communications*, vol. 40, no. 6, pp. 1728–1767, 2022.
- [11] C. Ouyang, Y. Liu, H. Yang, and N. Al-Dhahir, "Integrated sensing and communications: A mutual information-based framework," *IEEE Communications Magazine*, vol. 61, no. 5, pp. 26–32, 2023.
- [12] J. Pöppel, S. Kahl, and S. Kopp, "Resonating minds—emergent collaboration through hierarchical active inference," *Cognitive Computation*, vol. 14, no. 2, pp. 581–601, 2022.
- [13] O. Çatal, T. Verbelen, T. Van de Maele, B. Dhoedt, and A. Safron, "Robot navigation as hierarchical active inference," *Neural Networks*, vol. 142, pp. 192–204, 2021.